

Histoire et résumé sur ma thèse « empreinte optique »

*Ou « quelques réflexions sur 3 ans de travail sur la CFAO dentaire entre Noël 1970 et Noël 1973 »
(Dental French DDS)*

Même si aujourd'hui je me souviens que l'idée générale de « l'empreinte optique » m'est venue à l'esprit en quelques minutes, je dois bien avouer qu'il me fallut de nombreux mois d'attention, d'analyse et de recherche pour en faire quelque chose de construit. Il fallait passer de la folle réflexion intuitive à un concept logique sur le plan scientifique et technologique.

Les fondements même sur lesquels reposaient alors mon travail, rédigé loin de tout, ont été présentés au professeur Jacques Dumas pour une première correction en décembre 1972. Ils étaient à la fois nombreux et mal structurés. Après 3 mois de travail, de la deuxième version elle définitive (**document 8 et 9**), émergeaient les règles suivantes :

Si l'on veut respecter le concept théorique de l'empreinte optique, il faut

- mesurer et respecter au mieux les informations volumiques collectées sur l'objet étudié. Pour ce faire il faut réduire le plus possible les échanges énergétiques entre les différents intervenants (pâtes, modèles, matériaux et ... milieux). Si l'on respecte ce principe, on a de forte chance que l'imprécision soit ramenée à son strict minimum. (en 1971 le choix de la mesure par la lumière structurée cohérente me paraissait le choix le plus judicieux)
- protéger contre les agressions de toute nature les informations recueillies en utilisant des bases de données absolues, non modifiables par le temps. Mon choix s'est porté logiquement sur l'outil numérique et ses co-symboles mathématiques (comme par exemple le langage binaire). La conversion analogique et l'utilisation de l'ordinateur me sont apparues comme les meilleures garanties de cette protection si importante pour l'analyse, la modélisation ou l'usinage mais aussi pour la fiabilité du diagnostic et la thérapeutique en découlant.
- établir des règles strictes, rigides et reproductibles agissant sur ces valeurs afin de garder dans une « mémoire » (analysable et utilisable par tous) les grands mécanismes ayant dirigés les actes médicaux et permis d'atteindre les résultats souhaités. Ce sont en quelque sorte les systèmes experts et l'intelligence artificielle appliqués à la médecine avant l'heure. Il fallait montrer que nous pouvions travailler ces informations collectées sur le patient avec des outils scientifiques reconnus. Il fallait aussi que les outils utilisés ne soient plus individuels mais qu'ils appliquent des fonctions totalement maîtrisées par les sciences exactes : la physique et les mathématiques (en ayant comme vecteur d'action la mécanique ondulatoire et les logiciels informatiques).
- restituer un objet identique ou complémentaire sous une forme réelle, analogique et palpable, après et seulement après avoir appliqué toutes les opérations nécessaires à sa bonne conception. Il n'était pas question de faire une simple copie d'une préparation ou la duplication négative d'un modèle mais de suivre des règles médicales permettant la fabrication d'une vraie prothèse thérapeutique.
- élargir le champ d'action des matériaux utilisables à l'ensemble des matériaux disponibles sur terre afin d'éliminer la dépendance aux matériaux métalliques ou aux reconstitutions longues et coûteuses comme l'or ou la céramique. L'usinage de l'apatite me paraissait particulièrement intéressant ainsi que le fait de ne pas modifier la structure du matériau (qualité du suivi)
- Enfin généraliser cette méthode à l'ensemble de la médecine (diagnostic et réalisation de prothèses). L'empreinte optique couvrirait non pas seulement la dentisterie mais toute la médecine. La dentisterie me paraissant l'application la plus évidente pour démontrer son efficacité future de par la complexité de la conception des prothèses s'y rattachant..

Ceci résumait les règles que j'ai tenté d'établir à l'époque (1971-1973) et qui devaient régir la théorie de l'empreinte optique, appelée aussi aujourd'hui CFAO dentaire ou Dental Cad/Cam.

Il m'a semblé intéressant de résumer en une vingtaine de pages les 300 pages de ma thèse. Ceci me semble avoir l'avantage de simplifier la présentation que je faisais à l'époque de cette théorie et de souligner les passages qui se sont avérés importants par la suite. On remarquera en particulier les similitudes entre l'imagination purement spéculative en 1973 et **la CFAO dentaire ou Dental CAD/CAM aujourd'hui**.

Dans chaque chapitre est indiqué précisément la page (éventuellement la ligne pour les passages à souligner plus spécialement) correspondant aux passages résumés. Cela permettra au lecteur de savoir où trouver les informations citées dans le document complet qui est joint. Cela montrera aussi que cette première description de la CFAO dentaire à partir d'une empreinte optique (ou d'un palpeur) et l'intercommunication par des réseaux informatiques spécialisés.... embrassait déjà un large domaine dépassant la simple fabrication de couronnes

Mais revenons à la première partie de ce travail: son introduction. (Avertissement) et l'histoire entourant sa rédaction ... bref la petite histoire ... ce qui me permettra de combler certains vides bibliographiques d'auteurs quelquefois plus connus qu'ils ne connaissent pas les dates des publications de leurs collègues.

Sur la petite histoire autour de cette thèse : il était une fois

Il était une fois sur les discussions se rapportant à la date d'invention de la CFAO dentaire et médicale.

A ma connaissance il s'agit de Noël 1970. Après ce fut une phase de validation, de développement scientifique et de première rédaction (1971-1972) (**document 1 et 2**) puis une phase de correction et re-rédaction (janvier - juin 1973) (**document 3**) et enfin une phase de validation par mes maîtres (juin - octobre 1973) (**document 4**). La soutenance et la mise à disposition du public ont eu lieu le 27 février 1974 (**document 5**). Il va de soit qu'ils existent de nombreux documents accompagnant ce travail.

Pourtant, à l'origine, tout me semblait simple (l'innocence de l'âge sans doute).

Il était une fois ... sur l'origine de l'idée dans une tête de 22 ans .

On me demande quelquefois comment cette idée est arrivée :

- Tout a commencé, inconsciemment sans doute en 1969 par une étude du sonar, appareil dont j'avais découvert l'efficacité lors de la recherche des bancs de sardines par les bateaux de pêches au lamparo, au large de Port Vendre, d'où cette première phrase dans l'introduction de ma thèse «... l'idée de recherche théorique découlant de l'examen du principe du sonar ... ».
- J'ai eu ensuite la chance de pouvoir comparer en 1970 les études sur l'irradiation laser à rubis (et l'holographie) menées par le Prof. J. Dumas (membre du Jury et directeur de thèse) et les empreintes « infernales » au stens réalisées tant bien que mal à l'aide d'une casserole d'eau bouillante dans les sous sols de la faculté dentaire de Lyon.

Inutile de dire que le décalage des deux technologies... m'a sans doute frappé...

Un bon repas de Noël (1970) bien arrosé avec mes deux oncles , Bernard Duret chirurgien- dentiste et Jacques Sirodot informaticien a fait le reste....

Le lendemain matin, au petit déjeuner et ... dans la tête un reste de nuit sans sommeil, la chaîne complète composée de l'empreinte optique, de la modélisation 3D informatique et de la machine outil à commande numérique m'apparaissait comme la seule solution à tous mes problèmes pour réaliser correctement une prothèse médicale.

Il était une fois sur le pourquoi avoir écrit un document aussi long alors qu'il était de coutume qu'une thèse de deuxième cycle (DDS) fasse à cette époque un maximum de 60-80 pages.

Dans l'avertissement de la thèse , nous pouvons retrouver l'esprit qui m'animait (et qui m'inquiétait) lors de la construction de ce travail. J'étais alors un élève de 22 ans en 3^e année (Sophomore) à la faculté dentaire de Lyon lorsque que me vint l'idée de la CFAO dentaire. J'étais aussi étudiant en licence à la faculté des Sciences. Cette double appartenance m'interdisait d'ignorer qu'un travail expérimental, surtout dans la patrie de Claude Bernard, ne pouvait pas être le simple dépôt d'une hypothèse de travail présentée sur une dizaine de ligne. J'aurai pu le faire si j'avais eu un minimum de crédibilité, mais en janvier 1971 qui m'aurait cru !

Cette remarque est importante car elle explique pourquoi mon texte complet n'a été remis à mes correcteurs que 2 ans plus tard entre décembre 1972 (Prof. Dumas et Marty, mes vrais correcteurs) et en juin 1973 (pour validation après une longue et précise correction de J Dumas). Ce délai m'a souvent valu des critiques mais il était à mes yeux nécessaire pour démontrer scientifiquement cette théorie.

En effet ... mon éducation à la faculté des Sciences m'avait appris que l'affirmation péremptoire d'un fait ou d'une idée, sans preuve scientifique pour la valider, ne vaut rien sinon un espoir coupable ou une gloire éphémère. En cela je tiens à rendre hommage à l'un de mes maîtres, le Professeur Jacques Dumas, qui a su me le rappeler gentiment mais toujours fermement.

Il me fallait donc prouver ce que j'affirmais (et qui était mon intime conviction) auprès des autorités universitaires (et la chose était osée en 1970 !).

Pour cela, après cette première idée « flash », j'ai mené pendant 2 ans ½ un travail de fourmie ayant pour objet l'analyse globale et réfléchie du concept, la compilation des documents s'y rapportant, le contrôle par des spécialistes de très haut niveau de chaque point imaginé et la vérification méticuleuse de chaque étape. Ceci ne m'empêcha pas d'oser imaginer de nouveaux concepts comme le système expert médical/intelligence artificielle, les connexions entre le laboratoire et le cabinet, liaisons qui n'existaient pas encore (Internet) ou la télétransmission opératoire entre un centre médical et une station déportée voir même spatiale.

Certes, ce ne fut pas évident mais ceci explique aussi qu'il m'ait fallu effectivement un minimum de 2 ans 1/2 pour écrire cet ouvrage.

Il était une foispour ceux qui penseraient que 6 mois ont été suffisants pour écrire ce document !

... c'est-à-dire entre juillet 1972 et juin 1973, comme cela a été sous entendu dans certaines publications ou livres d'auteurs, il me semble utile de rappeler qu'à cette époque:

- les traitements de texte n'existaient pas et tous les documents étaient écrits à la main puis retransmis pour être tapés à l'aide d'une machine à écrire, avant d'être à nouveau tapés sur des feuilles spéciales dites « à Ronéo » (que j'ai gardé précieusement). Ce travail m'a pris 4 mois.
- mes connaissances fondamentales, malgré la patience de mes maîtres...et ce n'est pas peu dire, étaient très limitées dans ces domaines extrêmement pointus que sont l'holographie, la modélisation 3D, les lignes commutées ou les machines outils à commandes numériques (même si par autorisation spéciale de mon doyen R. Vincent, je fus autorisé à poursuivre mes études en même temps à la faculté des sciences et à la faculté dentaire)
- ma jeunesse était sans doute un atout pour oser mais un handicap pour construire (j'ai écrit cet ouvrage entre 22 et 24 ans),
- durant cette période j'ai été très occupé par des études très prenantes (car non seulement durant ces deux années ½, j'ai validé ma 3^e, 4^e et 5^e année en faculté dentaire mais j'ai aussi passé deux certificats d'étude supérieure à la faculté des sciences dont l'un des plus difficiles, celui de « biochimie structurale et métabolique » en septembre 1973).
- Comme tous les élèves de « dentaire », afin de connaître le métier (mais aussi d'avoir un peu d'argent) j'avais une activité professionnelle durant mes 2 mois de vacances scolaires (remplacement du Dr Raclet, chirurgien -dentiste à Thoissey).
- Enfin et comme la plupart des étudiants.... j'avais une vie privée dont le point culminant fut sans aucun doute mon mariage avec Elisabeth le 27 Août 1973.

Voilà pour tous ceux qui douteront encore ...

Il était une fois pour ceux qui penserait encore que B. Altschuler m'a précédé dans cette voie.

C'est un débat que j'ai quelquefois, principalement avec ceux qui n'ont jamais lu la publication de B. Altschuler en 1973 cité par W. Moermann en 1989 dans son ouvrage "Die CEREC Computer Reconstruction". Il est normal qu'il l'ai cité car à l'époque, les travaux du CEREC étaient en retard mais concurrentiels des nôtres. Je dois aussi préciser que c'est mon silence sur cette thèse qui a conduit W. Moermann à faire cette erreur car il a toujours été un concurrent d'une extrême loyauté. Je dois l'en remercier très sincèrement du fond du cœur.

Toujours est-il que je n'ai jamais pu répondre à cet injuste positionnement de mon invention car si j'avais mis en évidence ma thèse (1973), une petite partie de mes brevets déposés maladroitement 7 années plus tard (1980) aurait pu être antériorisée, même si ce n'était pas l'avis de mes conseils. J'ai donc été condamné au silence pendant 20 ans et ce n'est qu'en 2006 que j'ai pu commencer à me défendre.

Pour que vous jugiez par vous même, il me semble très intéressant de vous présenter ce texte d'Altschuler plutôt que de le citer (page 10 pour les couronnes). Vous le trouverez complet dans cette page de mon Web sous **"Cadcam. Altschuler.1973.article"**

Si vous l'avez lu, vous pouvez vous rendre compte de la différence entre 8 lignes purement spéculatives (puisqu'il n'y a aucune démonstration) et les 300 pages de ma thèse. En plus de cela, le sujet expérimental de l'article ne se rapporte pas à la CFAO dentaire mais à des visualisations de déformation par franges d'interférences largement publiées à l'époque en optique non-cohérente/cohérente et connues sous le nom de "photo élastimétrie". (**document 24**)

Par ailleurs, comme Altschuler, mais 2 ans plus tôt, ce concept interférométrique est présenté dans ma thèse dans le sous-chapitre " travail du métal (zone de contrainte)" du chapitre 9, comme une application de l'interférométrie. Cette application sera le corps des 18 pages de son article de 1973. Je prouve donc ici que ceci m'était parfaitement connu sous le nom de photo élasticimétrie (voir p250 lignes 7-13 et dessin 72c). Comme lui je décris les conséquences de cette application.

Et comment comparer le travail d'un étudiant de 22 ans évoluant sans laboratoire ni expérience et les 8 lignes d'un capitaine au Centre de Recherche de l'US Marine situé en Californie ! Tout me semble démesuré !

J'ignore si B. Altschuler a pensé à cela avant Noël 1970. Lors de nos rencontres il ne me l'a jamais dit, mais ce qui est sûr c'est qu'il pouvait écrire ce document en quelques jours alors qu'il m'était impossible de le faire de ma thèse comme je l'ai expliqué plus haut. Au moment de ses travaux, ma thèse était pratiquement écrite, donc il me semble logique de penser que j'ai eu cette idée largement 2 ans avant lui. Si je n'avais fait qu'écrire 8 lignes, cela aurait été fait en janvier 1971 soit 3 ans avant la publication de son texte trop souvent cité en référence.

Plus fondamental est sans doute ce qui nous sépare dans nos motivations et nos synthèses sur l'empreinte optique. Dans ma thèse, loin de ne faire qu'associer des machines entre elles comme a pu le proposer B. Altschuler, c'est sur la base d'un concept de physique fondamentale qu'est construite cette analyse de l'empreinte optique. Au fond, ramener l'empreinte optique à un simple appareil m'était totalement insupportable car c'était laisser supposer que la dentisterie n'est qu'un simple travail technique alors que ses fondements s'appuient sur des raisonnements de physique et de chimie théoriques.

Enfin rappelons aussi que nous avons été les premiers à démontrer cette théorie en 1983 à Paris (Entretiens de Garancière) et les premiers à présenter un appareil complet et réaliser une couronne en congrès à Paris en 1985. La longueur de mon travail est expliquée par une phrase précise dans l'introduction de cette thèse « nous avons maintenant le devoir d'expliquer ce qu'est l'empreinte optique, comment cela marche et expliquer son choix ».

Il était une fois ... sur l'attribution de la notion de théorie

Cette analyse étant un "système de concepts donnant une explication d'ensemble à un domaine de connaissance" ou "connaissance spéculative idéale, indépendante des applications sans rapport avec la réalité ou la pratique" (Lexis Larousse p 1876)

Si nous nous reportons aux principes qui ont conduit à l'énoncé de l'empreinte optique dans cette thèse, il s'agit bien d'une théorie.

Si l'on se rapporte au chapitre 9 et aux appareils que nous connaissons aujourd'hui, il s'agit de son application. Le terme "empreinte optique" est bien générique.

Ceci explique et justifie l'importance que j'ai donné aux chapitres 1 et 2 (plus de la moitié du travail).

Il était une fois ... enfin sur les erreurs que j'ai commises à l'époque de la rédaction de cet ouvrage .

J'ai fait un certain nombre d'erreurs dans cette thèse mais la plus grosse est queje prédisais la sortie de la première machine avec la certitude et l'aplomb de mes 22 ans, pour 1980 ... mes oncles, tout en m'encourageant, ont émis quelques réserves ... cette première machine complète et connectée a vu le jour en 1984 chez Henson int..

Après la petite histoire, voici maintenant, chapitre par chapitre, un résumé de cette thèse:

Chapitre 1

Nous avons de nombreuses variations dimensionnelles dans tous les corps (matériaux, pâtes ...) utilisés en dentisterie. Ceci est rédhibitoire pour une bonne transmission de la forme de l'empreinte de la bouche du patient au cabinet dentaire ou au laboratoire (tous les dessins 1 à 16).

Chapitre 1.3

Ce sous-chapitre explique la raison qui justifie scientifiquement le choix de l'empreinte optique au dépend de l'empreinte classique (que j'appellerai plus tard « chimico-manuelle) ou du micro palpage.

Il y est proposé une explication sur les causes d'erreurs lors de la manipulation de tous nos matériaux, la raison de ces erreurs et la solution possible qu'apporte l'empreinte optique pour les réduire : utiliser le quantum d'énergie (le photon) pour que l'échange énergétique entre l'appareil de mesure et l'objet mesuré soit réduit au minimum.

Nous avons de nombreuses variations dimensionnelles dans la manipulation de tous les matériaux utilisés en dentisterie. Ceci est totalement réhilitaire si l'on veut respecter les mesures des empreintes transmises au laboratoire. (ch 1.3)

Aussi, page 50, je me pose deux questions : pourquoi avons-nous des variations dimensionnelles et est il possible de trouver une explication (et une solution) en s'appuyant sur la physique fondamentale ?

Ceci m'amène à proposer plusieurs hypothèses de travail:

Dans tous systèmes existe une énergie globale appelée **Enthalpie**¹. Cette enthalpie est composée d'une partie accessible, utilisable (ou l'énergie libre) et d'une partie non atteignable, liée à la structure atomique du corps sur lequel nous travaillons et qui est appelée Entropie.

Cette entropie est, de part sa définition, une énergie qui varie en permanence car la structure atomique d'un corps est sensible aux pressions, aux températures ... et aux réactions chimiques.

En dentisterie l'entropie accompagnant nos réalisations de prothèses variera tout particulièrement au moment de la prise d'empreinte et de la coulée des matériaux car utilisons des réactions chimiques (polymérisation ...) ou des changements d'état (hydrocolloïdes, coulée des métaux ...).

On doit donc agir sur une énergie que l'on ne peut pas maîtriser. L'imprécision est donc fondamentalement inhérente et indissociable du choix du mode de travail actuel.

Ceci m'amène (p 51 ch. 1.3.2) à poser mes 3 principes de précision (2 à l'époque, qui seront repris par la suite par des auteurs qui oublieront de me citer) :

- **Principe n°1** : *La précision n'existe pas dans l'absolu. Elle n'est qu'une probabilité directement issue de la probabilité d'existence de l'entropie* (de l'état structural et moléculaire du système d'empreinte ...)

- **Principe n° 2** : *Un système d'empreinte sera d'autant plus précis que son entropie (et celui de l'objet mesuré) ne varie pas durant la réalisation de la prothèse. La précision absolue ne peut donc pas exister en dentisterie car nous ne travaillons pas à -273°C*

- **Principe n°3** : *Tout système d'empreinte est forcément imprécis car il subit et fait subir à son environnement des variations de structure, de pression et/ou de température.*

Les différents types d'action provoquant ces imprécisions sont, me semble-il :

- l'imprécision au choix du matériaux (réactions chimiques ou changements d'états)
- l'imprécision dûe à notre action (réactions chimiques des produits en prise)
- l'imprécision indirecte ,ou impropre, dûe aux variations imposées par le milieu (température, pression, déformations d'un corps)

Je me pose alors la seconde question fondamentale (à mes yeux de jeune chercheur) : **est il possible de trouver une explication et une solution en s'appuyant sur la physique ?**

- Sommes-nous capables en physique traditionnelle ou quantique d'avoir un corps (système) dimensionnellement stable ?
- Sommes-nous capables d'avoir un corps isolé de son environnement (bouche, salive, lumière ..) ?
- Si ce n'est pas le cas, comment faire pour que ce corps soit le plus stable possible donc le plus respectueux de l'enthalpie du système ?

¹ L'oscillation entropique est fondamentale et a un rôle considérable (page 51) dans de nombreux états du système et dépend de multiples facteurs (arrangement moléculaire, composition, nombre d'atomes dans la structure, groupement, structure ionique ou atomique, température, pression) et ces variations peuvent se faire avec les systèmes voisins (principe de Meyer/Joule)

C'est la réponse à cette deuxième question qui a justifié l'emploi de l'empreinte optique pour faire une empreinte . C'est l'utilisation de la lumière (le photon) qui perturbe le moins l'enthalpie d'un corps et l'information que l'on en retire (ensemble du système) pour réaliser nos prothèses.

J'allais découvrir plus tard que l'énergie nécessaire à une mesure est toujours puisée sur l'objet mesuré, mon concept était fondamentalement bon puisque j'avais choisi la méthode prélevant le moins d'énergie.

Ce passage est donc la pierre angulaire, la clé de voûte de tout mon concept d'empreinte optique.

En partant de cette définition de la stabilité dimensionnelle d'un système (corps) en physique, j'ai essayé de définir ce qu'est la précision (à mes yeux) car, il me semblait qu'en dentisterie cette notion était présentée à l'époque de manière inexacte dans les articles et les ouvrages. Il était courant de lire que "pour qu'une prothèse s'adapte correctement sur une préparation, il vaut mieux qu'elle ne soit pas trop précise".

Cette deuxième étape allait me permettre de proposer des solutions (empreinte optique) et de visualiser ses limites théoriques.

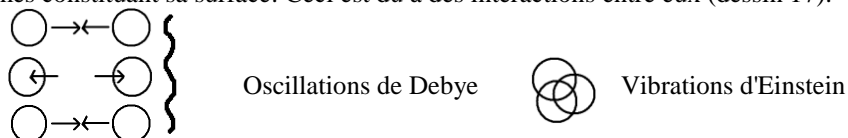
Notre système (empreintes , modèles ...)n' est stable que s'il est isolé, ce qui est impossible. S'il l'était, cela voudrait dire que les autres systèmes voisins ne lui communiquent aucune variation énergétique. Nos pâtes d'empreinte sont donc des systèmes «solides » pouvant subir les variations de l'environnement. Même au repos, il existe des variations dimensionnelles dues à des oscillations électroniques naturelles portées par une énergie propre à l'entropie. Ces micro variations à l'échelle électronique montrent que la précision absolue n'existe pas. (dessin 18 p 55)

Conclusion 1a : nous ne connaissons pas la position limite des atomes bordant la surface de nos empreintes et de nos matériaux. Cette surface est "floue". Elle oscille en fonction des conditions physiques et particulièrement de la température. On a seulement, à l'échelle atomique, une probabilité de connaissance de la position de la surface de l'objet que l'on mesure.

D'ailleurs ces micro-déformations ont été décrites en physique quantique par Einstein ou Debye (voir chapitre 1-3-3 p53)

- les atomes du solide d'Einstein en physique quantique (ou non) constituant la surface d'un corps vibrent légèrement d'où une imprécision dans la définition de leur position appelée "nuage de présence".

- l'ensemble associé aux solides de Debye se caractérise par des mouvements ou oscillations continues des atomes constituant sa surface. Ceci est dû à des interactions entre eux (dessin 17).



il faut minimiser ces variations ou ces modifications énergétiques du système car elles entraînent des modifications du volume des corps donc de l'imprécision. Je propose dans cette thèse une méthode pour diminuer ces variations énergétiques. (voir ch. 1-3-4 p 54-56)

Pour les minimiser, il faut les connaître.

Cette méthode de raisonnement très cartésienne m'a conduit à les disséquer puis à les classifier pour voir si elles étaient maîtrisables. J'ai ensuite cherché à éliminer celles qui pouvaient l'être. (voir ch. 1-3-5 p56). Ce travail de fourmie m'a permis d'établir un tableau comparatif des méthodes de mesure et de démontrer que si la méthode traditionnelle d'empreinte était la plus consommatrice d'énergie, l'empreinte optique était celle qui semblait la plus économe. « pour définir notre action, il faut connaître l'objet sur lequel nous avons décidé d'agir. (voir p56 »

Nous pouvons résumer cette classification des erreurs de la manière suivante:

Les erreurs primaires : elles sont le résultat de notre action lors de l'exécution de la méthode choisie : Expl : réaction de polymérisation des pâtes d'empreinte silicone (elles seront majeures si elles s'appliquent sur tout l'objet et seront mineures si elles s'appliquent seulement sur une partie de celui-ci)

Les erreurs secondaires : elles sont la conséquence d'une mauvaise manipulation ou d'une réaction du milieu environnant. Ex : polymérisation trop rapide. Elles peuvent être majeures ou mineures.

Les erreurs tertiaires : elles sont complètement indépendantes de notre volonté et inconnues au départ. Expl: le patient bouge pendant la polymérisation. Elles peuvent être majeures ou mineures.

L'étude comparative, reposant sur cette classification, m'a permis de montrer :

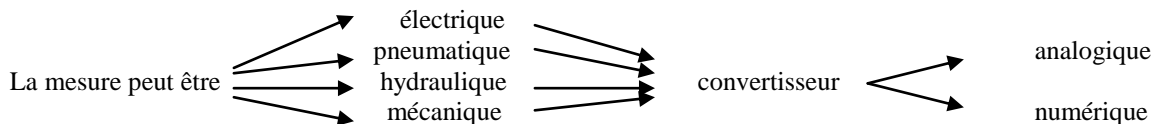
- qu'il existe une forte disparité entre la méthode traditionnelle (classique) et la méthode optique.
- qu'avec les méthodes classiques il est possible d'agir fortement sur les imprécisions secondaires et primaires mais peu sur les imprécisions tertiaires.
- que la méthode optique n'oblige pas à diminuer ces erreurs car elle permet d'en supprimer un grand nombre

Or, être précis, c'est diminuer les erreurs voir les supprimer. Comment pouvons nous le faire ?

Pour les supprimer, nous allons nous imposer un certain nombre de règles (voir ch. 1-3-7 p60).

- a) la mesure sera « numérique (métrique) » et non pas analogique (modèle) .
- b) nous choisirons l'unité de mesure la plus petite (l'Å ou le nm) et non pas le micron
- c) pour bien mesurer nous appliquerons des principes physiques au milieu biologique. Pour ce faire l'information sera transformée le plus rapidement possible en données numériques enregistrables.
- d) Le système de mesure se composera
 - d'un capteur et d'un transmetteur (transducteur A/D)
 - d'un amplificateur
 - d'un enregistreur ou d'un système de transmission de données (liaison)
- e) le système doit être le plus possible indépendant de l'objet mesuré (fonctionnement isolé)
- f) l'unité de mesure idéale est le krypton

Ce qui me semble le mieux répondre à ces exigences est le système suivant : lecture optique suivie d'une conversion analogique/digitale. « Il doit mesurer sans modification » (voir p61 ligne 21).et un convertisseur inverse numérique/analogique doit fermer la chaîne (voir ch.1-3-8 p62)



Les conséquences de ce choix sur nos erreurs sont les suivantes:

- 1) pour supprimer *l'erreur primaire*, il faut éviter toute variation de l'enthalpie (ΔH) du système. Pour cela on utilise le support énergétique le moins sensible et le plus précis: la lumière et sa longueur d'onde λ .
- 2) pour supprimer *l'erreur secondaire*, on numérise le plus vite possible l'information en faisant une conversion A/D immédiate de la mesure "optique": l'interférométrie et l'holographie permettent cette conversion analogique digitale (voir p63)
- 3) pour supprimer *l'erreur tertiaire*, on utilise le rayon laser qui est extrêmement rapide et on duplique l'information sur un support numérique non modifiable.

Ceci m'a amené au chapitre 1-4 p 63 à décrire la méthode de l'empreinte optique.

Elle utilisera les techniques suivantes:

L'empreinte optique a trois étapes: l' holographie et son balayage, le stockage et l' usinage

1) un ensemble d'appareil de mesure et de conversion:

- notre grandeur analogique est le volume à mesurer. Il existe une relation entre la distance et l'intensité lumineuse mesurée $1/l' = D/D'$. Ainsi j'explique page 64 que des cellules

photoélectriques mesureront l'information de la distance en fonction de l'intensité qu'elles reçoivent.

- un convertisseur analogique numérique. Nous proposons un balayage optique qui conduit à des coupes qui rassemblées constituent « le volume optique » (voir ch. 1-4-2 p64)

- cristallisation négative (voir ch. 1-4-3 p65). C'est l'empreinte (le négatif) qui est stockée rapidement sur une plaque par interférométrie permettant un balayage différé ou qui est balayée directement par le tube cathodique.

2) Il faut être sûr que le laser n'est pas dangereux (voir Ch. 1-4-4)

3) une zone de stockage de l'information par holographie, stockage informatique ou à l'aide d'un magnétoscope. (voir Ch. 1-4-5)

4) un ordinateur (voir Ch. 1-4-6) (n'est pas obligatoire) mais est « l'aboutissement logique de tout »

5) une conversion intermédiaire numérique analogique (voir p67 ligne 14) c'est l'inversion ou usinage analogique ou optique (Rayon) comme dans **la stéréolythographie** ou **le système Bego** (voir lignes 14-16 p67 et dessins 20-21 p 66).

Dans la conclusion et le résumé, nous noterons des principes qui ont été largement développés par la suite:

- dans le **Cerec** pour les inlays (p 68 ch. 1-4-8 « phase de Marmasse »).

- dans l'usinage **des nouveaux matériaux** comme les céramiques (« Peut être pourrons nous supprimer le plombage de notre métier» ligne 18 ch. 1-4-9 p68)

- dans l'usinage optique (**Bego, stéréolythographie** : "usinage par rayon optique en ligne p 67")

- la technique **de Swinson** dans le dessin 22 p71

- lecture par balayage (caméra)mais aussi par palpeur mécanique comme dans le **Procera** (dessins 20-21 p 66)

- enfin j'aborde la notion **de double/triple empreinte**, non encore développée, permettant de visualiser la dent, la gencive, les veines et les os sous jacents avec un double ou triple rayon. (dessin 22 p 72)

Dans ces dessins 20-21 p 67, nous retrouverons tous les grands composants des systèmes actuels:

-le stockage suivant la lecture optique et la conversion A./D et D/A., la transmission par « internet », les dents théoriques puis transformées en dents fonctionnelles (pro), l'intervention des données musculaires et l'usinage 3D

La CFAO dentaire est donc née d'une recherche de la précision se basant sur des principes réunissant thermodynamique et physique quantique. (lire en particulier le Ch. I-3)

Chapitre 2: Choix du rayon permettant la mesure

Dans le deuxième chapitre, notre objectif était de mieux définir et restreindre notre champ d'action.

Nous avons cherché à répondre à la question suivante: **faire une empreinte avec autre chose que des pâtes d'empreinte, c'est bien, mais comment ?**

Comme nous voulions faire une empreinte ou « reconstitution tridimensionnelle » de l'objet d'une manière différente, plus rapide et plus précise, il nous fallait expliquer avec quel matériel et comment ce matériel pouvait répondre à nos affirmations.

Nous avons d'abord expliqué pourquoi nous rejetons certaines techniques de lecture 3D:

1- D'emblée (voir page 9 ,lignes 21-22) nous avons précisé que la méthode **par micro palpage (Procera)** était possible mais qu'elle nous paraissait « irrationnelle ».

2- De même, nous ne rejetons **pas la lecture par points ou par lignes lumineuses, comme tous les scanners actuels**, avec un balayage lumineux du die suivi par une cellule photo électrique (voir page 101 Ch. II-5 lignes 24-26) mais expliquons que l'interférométrie nous paraît plus intéressante car plus rapide.

3- Enfin la mesure par un temps en nanosecondes ou méthode par « **temps de vol** » ne nous est pas inconnue mais il ne nous paraît pas judicieux d'utiliser un Laser Yag très complexe dans un cabinet dentaire juste pour y faire une empreinte (voir p 118 , Ch. II 6-2-2 ligne 10).

...et le mot " interférence" est lancé dès la page 111 , (voir Ch. II-5-7-p 111 3°)..

La question suivante est évidemment : **quelle lumière utilisée pour obtenir cet effet interférentiel ?**

Comme nous devons remplacer le déplacement du "bras mesureur" par une fonction portée par le rayonnement lumineux, il fallait justifier comment cela fonctionne et pourquoi nous choisissons un type de lumière plutôt qu'un autre.

Ce fut l'objet des 50 pages de ce chapitre.

Nous avons d'abord expliqué la double nature corpusculaire et ondulatoire de la lumière en précisant déjà le rapport entre le carré de la distance et la mesure d'intensité. (voir page 96 II-4-2).

Puis nous avons détaillé comment, sur **une image interférentielle**, il est possible de retrouver cette information de distance, porteuse de la mesure.

Cette notion d'interférence, qui va être tellement développée par la suite dans les technologies que nous connaissons en 2009, apparaît omniprésente dans tout ce chapitre : par exemple dans une explication qui peut paraître aujourd'hui naïve, nous définissons le support mathématique dans le rapport intensité/distance en tout point d'une surface enregistrant une information interférentielle (voir dessins 33.34 et 35 pages 97 à 99) puis nous décrivons les supports physiques pouvant enregistrer ces informations (voir plaque ou la cellule photo électrique dans le chapitre II-5p, ligne 101)

De même les lasers à émission continue me paraissaient très intéressants (voir p 101 lignes 24-26 (II-5) et les couleurs vertes - UV plus précises (voir p115 II-6-2-2)

Ceci nous permet de faire les choix suivants **dans la conclusion**: (voir pages 123-124)

- une longueur d'onde (250 à 600 nm)
- une puissance (He Néon)
- une cohérence (laser)
- et une directivité (avec des fibres ou des miroirs comme nous le verrons dans le chapitre 9).

Ce qui ne m'empêcha pas d'imaginer des systèmes complémentaires **comme les bistouris lasers ou les coagulateurs** (voir p 123, Ch. II-8) et de préfigurer **la RMN/IMN** pour faire de l'imagerie interférentielle avant l'heure (voir page 86 Ch. 11-3-6)

Restait à savoir si ces choix étaient dangereux pour l'organisme humain. En effet l'empreinte se fait sur l'homme et en 1971, la connaissance sur cette action était encore bien limitée !

Ceci justifie le chapitre 3.

Chapitre 3 : Vérification de son innocuité.

Le but de ce chapitre est de rappeler les effets du laser sur les tissus humains et de savoir si les choix que nous avons fait précédemment, en terme de longueur d'onde et de puissance, sont dangereux lors de la prise d'empreinte optique.

Après avoir expliqué les risques inhérents au rayonnement laser, je fais un balayage systématique des informations sur le sujet et dont j'ai connaissance grâce au Prof Dumas, spécialiste de la question. La dentisterie ne s'y intéresse pas encore en 1971 et cette analyse me paraît nécessaire, voir utile pour mes confrères.

Cela me permet aussi de rappeler que la théorie de l'empreinte optique ne s'applique pas qu'aux réalisations des prothèses ou aux **visualisations en chirurgie mais aussi aux diagnostics de biologie, parodontologie et ODF**. (voir page 129 lignes 30-36).

On insiste sur l'aspect non dangereux du laser dans la mesure où l'on ne le focalise pas dans l'œil (p138) et que l'on choisi des longueurs d'onde peu agressives (p137 ligne 25).Ceci sera confirmé 15 ans plus tard par le laboratoire d'essai lors de la fabrication de la première sonde endo-buccale de la société Hennson (Duret Système).

On en déduit (voir p 147,lignes 4 à 7) qu'il faut un laser cohérent, à impulsion courte, d'énergie faible et de longueur d'onde proche de 650nm (range). Je rappelle une nouvelle fois qu'il faudrait faire de nombreuses études de contrôle. La notion de système qualité et de vigilance est très présente dans ce chapitre

En particulier, dans le chapitre III-4, nous renouvelons cette mise en garde en insistant sur le fait que les yeux peuvent être dans le champ de prise d'empreinte. Ceci doit être considéré comme important pour l'utilisateur, en particulier dans les phénomènes de réflexion et de transmission (voir p147 lignes 22-23).

Il me semble intéressant de souligner deux éléments particuliers dans ce chapitre:

- ces pages étaient **bien écrites et ronéotypées en 1973** (voir P148 ligne 1)

- je **propose d'ajouter à l'empreinte optique les rayons X** pour travailler en absorption et en réflexion (interférentielles évidemment) (ligne 22 p148)

Pour ce faire, notre étude sur les rayons X propose:

- 1) une réflexion sur les zones sous-jacentes en colorant ou non l'os sélectivement.(voir p148 lignes 30-32)
- 2) une coloration spécifique des vaisseaux pour permettre de les reconnaître et de visualiser l'anatomie sous-jacente.
- 3) une association rayon X et hologramme permettant de finaliser ces études complémentaires (radio 3D voir p148 dessin 46).

Ayant défini notre laser, il nous faut étudier dans le chapitre suivant les principes d'analyse et de stockage des informations captées sur le patient.

Chapitre 4 : Stockage des données

Ce chapitre est un chapitre de transition expliquant la raison du choix du stockage sur un hologramme.

Conscient de la masse d'informations que représente ce type d'analyse, il me fallait trouver un support de stockage rapide (pour éviter toute modification) et de grande capacité. En 1971-72, la plaque holographique était pressentie comme le support idéal. Aujourd'hui, ce type de stockage est utilisé dans tous les systèmes de "pointe".

Par ailleurs, la nécessité de pouvoir contrôler toute l'information me poussait à rechercher un stockage respectant la notion d'objet tridimensionnel. Cette visualisation sur un support "physique" accessible nous donne le temps de bien vérifier la qualité de notre saisie d'informations [comme on le fait aujourd'hui sur un écran d'ordinateur] (voir p162 ligne 4).

Cela me permet aussi de définir le champ d'analyse optique pour estimer la quantité des informations: le faisceau devait avoir une surface d'échange de 7x7 pour un modèle complet et de 1x2 pour un CR (voir p156 lignes 31-32).C'est le champ utilisé par les systèmes actuels (2009)

Ce qui m'importe au fond est de savoir s'il faut faire une lecture directe avec une caméra ou s'il est plus intéressant de passer par la plaque. Je choisis le moyen terme « une plaque » pour les contrôles et une caméra pour lire la plaque sans rejeter l'utilisation directe de la caméra sans plaque.(voir p161 lignes 27-32 et p162 lignes 1-6)

Ceci vaut pour la conclusion.

Aujourd'hui, certains passages prennent toute leur valeur:

- L'objet est bien une réalité 3D – Denis Young – « **le paramétrage est la fonction tridimensionnelle** de la constante diélectrique de distribution » (voir p160 ligne 16-1.

- Mais il ne m'a pas échappé qu'il faut que l'on puisse mesurer les variations de phase si l'on veut retrouver l'objet (voir lignes 26-29) (Bertolotti). Ceci me paraît assez prémonitoire des méthodes actuelles utilisées dans tous les systèmes **du Cerec au système Lava COS de 3M !**

- Je présentais d'ailleurs certains risques dans les fonctions d'analyse comme celui de la levée mathématique **du terme « a »** en rappelant que ces mesures se font toujours à un facteur multiplicatif près (voir p161 lignes 14-15).

Chapitre 5 : La conversion analogique - digitale (convertisseur A/D)

Ce chapitre est évidemment capital car il cherche à expliquer comment l'information, issue de données optiques ondulatoires (l'empreinte optique), peut devenir numérique afin quelle puisse être traitée par un ordinateur. Je crois me rappeler que cette transformation A/D m'a longtemps préoccupé et m'a obligé à plonger dans une multitude d'ouvrages. Cette thèse étant destinée à un jury dentaire, il me fallait l'expliquer d'une manière indiscutable: de la lumière j'obtiens des chiffres !

Il faut se rappeler qu'en 1972 les CCD/CMOS pour les caméras n'existaient pas. La plaque holographique est la solution de substitution souvent présentée comme telle par les scientifiques aujourd'hui: à chaque Pixel, est associé un grain de plaque et les deux sont susceptibles d'enregistrer une unité de phase.

Il existe deux solutions à mes yeux: (voir chapitre 5.1.1)

- soit assurer la conversion directe A/D à l'aide d'une caméra de télévision. Le balayage risque d'être trop long.
- Soit fixer l'empreinte sur un film holographique afin de réduire, de part la rapidité du stockage de l'information, le risque de flou provoqué par le bouger du patient ou de l'opérateur (ce qui, nous le savons aujourd'hui est très important dans le choix des méthodes)

Ceci m'amène à aborder deux aspects de la précision/résolution de la méthode et de définir le nombre de points objets minimums à récolter (qu'on appellera plus tard pixels) (voir chapitre 5.1.2.2), donnée fondamentale si l'on veut dimensionner le système de captage de données.

Il me semble alors logique d'utiliser 20.000 à 40.000 lignes sur 10 cm² de projection ce qui nous amène à l'équivalent CCD de 4 millions de pixels. C'est exactement le chiffre utilisé aujourd'hui par les scanners (voir chapitre 5.1.2.4). Ceci est une des raisons qui me font parler d'une thèse qui avait 40 ans d'avance.

La notion de traitement de l'information (amplificateur de brillance) et le temps de lecture (conclusion) sont d'ailleurs clairement définies dans le chapitre 5.1.2.4. Elles sont fonction de la qualité de la lecture et j'en profite pour souligner les problèmes de réflexion "si la réflexion n'est pas suffisante" qui conduiront à l'adjonction de coating dans **le CEREC et autres systèmes**.

Cette information pourra être visualisée en temps réel (voir chapitre 5.1.3.1) ou en temps différé, transmise à l'aide de l'hologramme (voir chapitre 5.1.3.2) à une unité de lecture.

Le tout m'amène à décrire différentes caméras d'analyse pour en choisir une (voir chapitre 5.1.2) répondant à nos exigences technologiques. Cette étude est menée sur la base de deux types de lectures : celles utilisant le principe de la photo conductivité et celles utilisant le principe de la photo émissivité. **La photoconductivité est l'ancêtre du futur CCD !**

Cela me permet de recommander une nouvelle fois de travailler en binaire (voir chapitre 5.4.1).

Il apparaît à ce niveau la notion de **rentabilité du système**: cette rentabilité passera par la richesse des applications offertes par l'ordinateur (voir chapitre 5.4.1). En effet l'usinage simple d'un modèle, que l'on peut réaliser sans ordinateur et sans conversion analogique digitale (en ne travaillant qu'en tension électrique) ne me paraît pas suffisant même si je n'exclue pas totalement (voir chapitre 5.1.1).

Pour appuyer ces calculs de conversion A/D, je rappelle que je me basais sur les travaux mathématiques de Denis Yunk (voir Chapitre 5.4.3). Dans chaque chapitre existe ce souci constant de m'appuyer sur des travaux reconnus.

Ce qui me paraît aujourd'hui intéressant dans la conclusion de ce chapitre se trouve page 177 (version UK page 159):

1) est ouvert le débat suivant: pouvons nous utiliser un micro palpeur ? Nous pouvons l'utiliser (comme **le Procera** le fera plus tard) mais cette analyse reste trop lente à mes yeux . Cette position sera adoptée **par Nobel Biocare en 2009 après 25 ans d'utilisation du palpeur mécanique**.

2) il me **semble préférable d'utiliser l'empreinte** par des moyens optiques car il existe des supports de mémoire de l'empreinte qui sont immédiats et/ou suffisamment rapides (ici un hologramme).

3) Cette méthode permet de transmettre l'empreinte en temps réel grâce à une caméra analyseur de franges d'interférence (**comme tous les systèmes actuels**).

4) Enfin je rappelle que l'empreinte optique peut mémoriser les données réelles d'un objet dentaire avec une **précision pouvant atteindre 5 à 10 µm**, nombres prémonitoires puisque ce sont les valeurs atteintes aujourd'hui.

Chapitre 6 : le logiciel de CAO traite les données de l'empreinte

Si l'on s'en rapporte aux systèmes actuels (2009), traiter de l'ordinateur et des softs CAO paraît fondamental. En 1971, les traitements se faisaient à l'aide de fiches perforées aussi l'entreprise était particulièrement osée.

Ce chapitre reste donc important car en quelques 12 pages est décrit le mode de travail assisté par ordinateur que l'on doit programmer pour:

- la réalisation d'une pièce prothétique (couronnes, bridges, inlays .. prothèse adjointe...)
- construire les principes d'expertises assistées par ordinateur pour l'aide au diagnostic dans toutes les disciplines médicales et dentaires comme l'ODF, la parodontologie ...

J'avoue m'être bien diverti lors de sa rédaction en été 1971.

Après avoir rappelé qu'il est possible de ne pas utiliser l'ordinateur (et sa numérisation binaire) et communiquer directement avec une machine outil en travaillant "en tension", j'explique que l'ordinateur justifie largement sa place car il nous permet de faire des travaux très variés sur l'empreinte (certes en augmentant le prix du système mais en préservant la précision).

Sont décrits ensuite les principes de fonctionnement des ordinateurs et l'intérêt de certains périphériques comme:

- les disques de stockage pour les données et les logiciels (voir p 180, ch. 6.1.1).
- les systèmes de connexion rapide "plug and plug" (appelés aujourd'hui USB ...).

Ce qui me paraît amusant aujourd'hui est d'avoir pressenti en 1972, l'intérêt du travail logarithmique, entre autre en Fortran (voir p 186, ch. 6.3.4), langage qui sera largement utilisé par les softs de dental CAD CAM 30 ans plus tard (Henson-Duret système).

Cela peut paraître long mais la présentation du fonctionnement d'un ordinateur et de ses périphériques montre qu'à l'époque il m'importait de bien expliquer que la maîtrise du CAD/CAM dentaire passait par une vérification méticuleuse de chaque maillon de la chaîne.

Vient ensuite (voir p 187 ch. 6.3.5) **la description de notre application dentaire, que l'on peut résumer comme suit** (lire les pages 187 à 190) (dessin 57 p 188) :

1. Nous avons 32 dents définitives et 20 temporaires en mémoire, ce sont les dents théoriques modélisées.
2. L'empreinte arrive sous la forme d'un ou de deux fichiers:
 - la préparation
 - la vue d'une des autres dents du patient qui servira à modifier la forme théorique pour la personnaliser aux dents du patient ou qui permettra de construire la modélisation extérieure sans difficulté (dent symétrique inversée).
3. On modélise l'intrados (intérieur de la prothèse) en "négativant" la préparation et en incluant l'espace pour le ciment (voir p 189 , ch. 6.3.5.2.2)
4. on adapte la modélisation extérieure de la dent théorique personnalisée en suivant les étapes successives suivantes :(voir p 197 ch. 6.3.5.2.1)
 - adaptation à l'intrados (ligne de finition)
 - adaptation à l'environnement (zones de contact)
 - adaptation à l'occlusion,
 - adaptation à la mobilité
 - adaptation à un éventuel déchaussement.
5. puis on termine cette modélisation en l'harmonisant au matériau utilisé (entre autre la céramique) (voir p 187, ch. VI-3-5)

Cette méthode est suivie par **tous les systèmes actuels**.

Ce système pouvant être localisé dans le cabinet / laboratoire ou déporté, je rappelle le rôle des terminaux (la saisie des données et le dialogue utilisé aujourd'hui par les scanners déportés) en proposant un type de dialogue qui sera lui aussi utilisé dans les systèmes dits "déportés". Vous trouverez ce diagramme de communication Homme Machine (HM) p 190 (voir ch. VI-3-6-2)

Je rappelle aussi que l'ordinateur, dans notre application, n'est pas qu'un simple outil de fabrication de prothèses mais qu'il **deviendra un outil d'aide au diagnostic et au traitement (système expert) en ODF et en Parodontologie**. (voir p 190 ch. 6.3.6.3)

Enfin une application qui me paraissait intéressante et qui est très utilisée aujourd'hui est décrite en 5 lignes (voir page 191 ch. 6.3.6.4) : il s'agit de positionner la dent modélisée sur le modèle virtuel initial

« holographique » pour vérifier si la modélisation informatique s'adapte bien avant de lancer l'usinage et j'appelle cela : **vérification de la prothèse** (no comment !)

Chapitre 7 : La conversion digitale - analogique (convertisseur D/A)

Cette étape permet de quitter l'information virtuelle pour matérialiser le travail conçu par l'ordinateur.

Les informations conçues par l'ordinateur arrivent dans la commande numérique:

1. soit sous forme de bandes perforées (que je considère comme dépassée, à ne pas utiliser)
2. soit sur une bande magnétique ,
3. soit par terminal (télétransmission ou appelé internet aujourd'hui) (voir ch. 7 p 195).

Comme dans chaque chapitre, dans l'introduction, j'explique toutes les fonction de notre future machine -outil (voir ch. 7.1 pages 193-195) pour justifier du rôle de la commande numérique. Est résumé en particulier le rôle de la commande des déplacements des axes et le rôle des résolveurs de contrôle de ces déplacements, le tout étant sous le contrôle des servocommandes présents sur chaque axe.

J'insiste sur le fait que la meilleure méthode est de travailler en boucle fermée et sous flot continu (ce que nous faisons aujourd'hui).

La commande numérique justifie de la nécessité d'utiliser l'ordinateur pour être plus précis (voir p 195) car il permet la génération des trajets d'usinage (voir p 200), le contrôle des vitesses de déplacement de chacun des organes mobiles et les critères nécessaires pour diriger la rotation de la broche en fonction des matériaux. Elle permet aussi de contrôler la lubrification, le matériau (voir p 203) et de l'usure des outils (voir p 201)

Cela m'amène à définir le rôle du prothésiste dans le système (voir p 200 , ch. 7.6.3 lignes 12 à 17) : "**le prothésiste prépare l'usinage, programme la machine -outil, contrôle l'exécution du programme et réalise la finition par céramisation : il devient un spécialiste**".

Nous sommes loin des critiques que l'on me fera durant 30 ans où l'on m'accusera de vouloir faire disparaître cette profession. De toute évidence, ce travail n'avait pas été lu.

C'est exactement la structure professionnelle que nous voyons aujourd'hui.

Il va de soit que la programmation sera essentiellement automatique (avec des calculs dépendants de la précision souhaitée et sous la forme de fonctions algorithmiques essentiellement par interpolation. (voir p 201 ch. 7.6.4.2 et conclusion p 202-206). Sont d'ailleurs rappelés les programmes type Apt, Autopol, Adapt

J'en arrive à penser qu'il faudrait des centres d'usinage spécialisés (voir p 201 ch. 7.6.4.4 et dessin 60 p 203) tels que nous les connaissons aujourd'hui. Je ne définissais pas celui qui allait dirigé l'ordinateur de modélisation car je voyais plus cette fonction dans ces centres spécialisés avec des opérateurs ad hoc. Ce sont aujourd'hui des prothésistes spécialisés en CFAO. Dans ce procédé ils pourront définir le type de prothèse (couronnes , coiffes ...), le type de métal (que je confond avec "matériau") (voir p 206)...

Ceci m'a conduit à penser qu'une bonne précision (10 µm) obligerait à traiter 2 millions de bits par empreinte (ce que nous faisons aujourd'hui). Je propose de réduire si nécessaire cette masse d'informations car en 1972 les ordinateurs n'avaient pas la puissance que nous connaissons aujourd'hui . Les solutions proposées sont les interpolations (**comme tous les systèmes actuels**) ou le passage à des usinages 2D1/2 (1e génération **CEREC**) ou encore en usinage 3D comme nous le voyons très souvent. Ceci me paraît en 1972 le minimum acceptable.

En conclusion (p 202 à 205) j'imagine **des dentistes associés à des prothésistes** faisant l'empreinte et la céramisation et envoyant l'usinage dans des centres spécialisés. J'imagine aussi des super centres de contrôle composés de mathématiciens , de professeurs des facultés dentaires et des spécialistes en matériaux, qui modifient, en fonction de l'évolution de la science, les programmes utilisés dans cette chaîne.

J'imagine aussi une immense toile d'araignée avec de nombreuses connexions permettant aux dentistes ou aux prothésistes les plus reculés de bénéficier des dernières données de la science. **Ces derniers pourront contrôler sur leurs écrans d'ordinateur** (voir p 204 ch. 7.7.1 lignes 26-29) **la prothèse rapportée à "l'empreinte optique" avant de l'usiner.**

En final, j'estime **le temps du procédé à 1h 30** si l'on veut une précision de 10 µm.... (p 205 conclusion). C'est le temps actuel d'utilisation d'un appareil de CFAO pour réaliser complètement un élément unitaire.

Chapitre 8: La fabrication de la prothèse.

Nous y abordons 9 types d'usinage, 2 classiques et 7 non conventionnels. **Toutes les méthodes d'usinage utilisées aujourd'hui sont décrites dans ce chapitre.** Aucune n'est oubliée ce qui rend les protections par brevet bien faibles au regard de ce texte:

- 1) Il y a, tout d'abord, une description de l'électro érosion sur 3 pages: Nous déplaçons la tête d'électro érosion, applicable pour toutes formes en métal (5µm de précision). Cette technique sera choisie par **Nobel Biocare pour le PROCERA**
- 2) L'usinage électro chimique sur 3 pages. Cette méthode est précise et donne un bon état de surface.
- 3) L'électroformage. C'est une électro déposition sur un mandrin existant. Cette technique a été reprise dans **le Wolf ceram**.
- 4) L'électro chimie: attaque par masques électroniques. Technique reprise **dans différents systèmes**.
- 5) L'Ultrason est décrit en application pour les caméras ultrasoniques et l'usinage. Ceci a été repris dans les années 1990 **par Kavo**. Je détaille l'imagerie ultrasonique par caméra et explique que le laser ultrason peut se réfléchir spécifiquement sur certaines zones (voir p221 lignes 17-21) et permettre, ainsi, une visualisation des tissus sous jacents. J'y aborde aussi le sondage ultrasonique (voir p223 ligne 1) et une application plus originale qui permet de sonder dans les matières plastiques pour les contrôles qualités. (manque la page 222 - dessin 65).

Noter dans le tableau 61b où est décrite la méthode de dépôts en couches par vaporisation (électrique), par faisceau laser ou par torche plasma, méthode développée d'abord **par Bego (milieu ionisé)** puis par d'autres compagnies à partir de 2005.

Il est signalé que l'on peut usiner et souder nos prothèses par ultrason comme l'a (voir p221 ligne 15-16) **proposé Nobel Biocare**.

- 6) Haute énergie. On peut poser des couches de matériaux avec une finesse de quelques microns (projection ou fusion d'un ion métallique) (voir p223 lignes 8-10) C'est la méthode par bombardement utilisé par **Bego aujourd'hui** pour déposer ou souder du métal ou de la céramique.
- 7) Laser. Le soudage et la découpe utilisés dans le **Procera** sont décrits (voir p227 lignes 16-19)
- 8) Fraisage. Je décris le rôle du micro palpeur du **Procera**, (voir p 227 lignes 21 à p 228 lignes 1-8). Je décris précisément la lecture par micro palpation pour la prothèse mais je lui préfère la lecture optique. Dans les lignes 24-26 on notera que:
 - soit c'est l'outil qui tourne comme dans **tous les systèmes**,
 - soit c'est la couronne comme dans le **Cerec** .

Ensuite sont définis tous les critères de programmation d'une machine (y compris l'usure) et les différentes étapes d'usinage, du dégrossissage à la finition. (voir page 229)

On notera en particulier:

- Les outils de contre dépouille sont décrits p229, ils sont utilisés dans **tous les systèmes actuels** (2009), surtout pour l'usinage 3D.
- La notion et la définition **du copeau minimum** sont abordés (y compris avec les résines p228 lignes 17-19) car l'araldite était la résine de référence à l'époque.
- Le dessin p230 définit toutes les méthodes: le mouvement de l'outil, le cône d'usinage, le magasin porte outil **de tous les systèmes**, le système **Cerec** avec la pièce prothétique qui tourne (**Cerec le génération**) et la finition à la fraise (**Cerec 2e génération**).
- Tous les facteurs d'usinage (y compris la programmation de l'usure sur abaques) sont rappelés (voir p231 lignes 4-22). Je continue (voir p232 lignes 1-10) par une étude des fraises diamantées (voir aussi p232 lignes 11-15).
- Nous en arrivons ensuite à nos applications actuelles pour l'usinage des moignons puis des prothèses avec de simples dépouilles. Voir un exemple d'usinage (p232 lignes 23-28).
- l'usinage des couronnes de **tous les systèmes** en trois, quatre ou cinq axes est étudié (p233) comme le double usinage du **Cerec**. Ce type de travail est à nouveau mis en valeur pour sceller plus vite (p233 lignes 20-32)

Dans la conclusion(p234) je rends (déjà) hommage à **M. Béziers** comme référence incontournable (avant de choisir ses surfaces de modélisation 10 ans plus tard !) et je parle des gabarits optiques d'**Altschuler** (voir p234 lignes 10-14) comme référence d'usinage.

Chapitre 9 : Application de la théorie de l'empreinte optique.

Ce chapitre est évidemment le plus important puisqu'il concerne l'application de la théorie de l'empreinte optique. C'est la démonstration de la faisabilité des étapes théoriques décrites dans les chapitres précédents.

Ce chapitre est construit comme un mode d'emploi de la CFAO dentaire. Compte tenu de son importance, il m'a paru logique de bien le décrire.

Il se compose de 33 pages (soit la moitié d'une thèse normale d'exercice à lui seul), de la page 237 à la page 270.

- 1) Est abordée d'abord une description de la caméra endo buccale qui sera utilisée par le chirurgien dentiste ou le prothésiste (sur modèle). J'explique qu'il faut utiliser une caméra TV comme lecteur holographique (je ne parle plus spécifiquement de plaques). La conversion analogique digitale est donc immédiate.
- 2) **Les dessins page 239 et 241** sont aujourd'hui particulièrement importants à mes yeux . Il s'agit bien d'une caméra endo buccale. Vous y trouverez aussi l'ensemble du système jusqu'à la machine outil avec les connexions internet , les magasins porte- outils bref le système complet que nous connaissons maintenant.
- 3) Je présente l'arrivée du CCD. Sont aussi décrites les liaisons caméra – conversion C/D-ordinateur – machine outil (voir dessin 68a et b). Il nous faudra faire le programme informatique créer une équipe de spécialistes (voir pP237 ligne 20)

4) Description du travail au cabinet:

On imagine maintenant les différentes étapes composant l'utilisation de la CFAO dentaire.

La première étape est l'empreinte ...

- a) préparation:
 - la dent est saine ou délabrée.
 - la préparation se fait normalement.
 - en chirurgie, ce qui montre que le concept ne s'applique pas qu'à la dentisterie, on effectue une empreinte avant ouverture de la zone, pour supprimer ce que l'on appelle l'empreinte "sanglante".
- b) Vérification:
 - on réalise une représentation 3D pour vérifier l'objet et la qualité du travail (préparation et empreinte):
 - en visant au travers d'un hologramme
 - en utilisant directement une caméra hologramme 3D,
 - Ces 2 méthodes de visualisation permettent d'observer l'objet agrandi (voir p240 lignes 1-15)
 - on peut aussi faire la rotation de l'objet pour le contrôler (comme nous la faisons aujourd'hui sur nos écrans de CFAO).
 - on peut enregistrer les différentes phases de notre travail (saisie dynamique du travail)
- c) Approfondissement: Il s'agit d'une généralisation des principes de travail énoncés ci dessus: j'y entrevois d'autres applications (voir p 242-243):
 - en pratique courante*:
 - l'empreinte classique (chimico-manuelle) n'est plus nécessaire.
 - on peut aussi communiquer l'empreinte chez un collègue ou un prothésiste pour avoir leur avis durant ou après le travail.

- en ODF on propose une visualisation dynamique des déplacements des dents.(voir dessin 70a p 243 lignes 3 et 8-13) Nous sommes dans les applications **de Invisaligne**.
- on propose aussi une analyse des mouvements ou déchaussements dentaires (voir dessin 70 b)

en enseignement et recherche :

- montrer les techniques de préparation pour les faire visualiser aux étudiants (**EAO PAO** avant l'heure !)
- enregistrer toutes les nouvelles idées pour les rendre toujours accessibles (**Google !!!**)

en général:(applications hors médicales)

- la reproduction de tout objet avec suppression du micro- palpeur.
- reproduction d'objets historiquement importants, fragiles ou rares
- reproduction de vues microscopiques agrandies pour les étudier plus facilement
- par superposition, aide aux études systématiques d'espèces et de familles d'objets.

A ce niveau je détaille une méthode pour l'étude des variations des objets par transformé de Fourier (voir p 244) à lire SVP

- visualisation d'objet inobservable grâce aux fonctions d'agrandissement: je prévois l'arrivée du **microscope effet tunnel**.
- suppression de la fabrication des maquettes: futur **stéréolithographie**: Photocopie 3D (prototype rapide)
- Transmission par téléphone du fichier.
- j'imagine aussi l'usinage de pièces défectueuses se produisant quand l'opérateur se trouve dans l'espace: dans Apollo par exemple ou dans les stations orbitales (voir p 244).

Sur le chapitre 9-2-3-2 , "empreinte optique secondaire"

L'empreinte optique secondaire , définie dans le chapitre 3, est une empreinte complémentaire dont l'interférence est obtenue dans un système de duplication ou de sélection en fonction de la longueur d'onde. J'applique à nouveau ce principe dans un brevet que je dépose en 1983 sous le nom de "étude morphologique ...". On peut rapprocher cela à **l'IRM ou le scanner** qui utiliseront les mêmes principes quelques années plus tard. L'interférence sera RX ou magnétique et ces méthodes feront aussi de l'imagerie. Les applications décrites ici se retrouveront dans les utilisations présentées. Mes 22 ans et la moquerie de certains de mes professeurs m'empêcheront d'aller plus loin !

- ◆ Il me semble fondamental de rappeler que la réflexion sur un objet est fonction de la longueur d'onde de la lumière projetée et de la couleur de l'objet éclairé. Ainsi il serait possible d'imaginer que les rayonnements peuvent interférer spécifiquement et l'interférence résultante dépendrait de l'objet observé. Ceci nous permettrait de sélectionner les empreintes optiques et de visualiser spécifiquement certains objets (os, peau, ... mélanocytes !!) (voir p 245)
- ◆ Des colorants sélectifs permettrait d'affiner cette sélection des zones précises que l'on souhaite étudier (voir dessin 70d). Ces applications sont diverses.

Les applications de cette empreinte « secondaire » sont ensuite décrites:

- visualisation *de dents incluses* et de l'environnement qu'il faut connaître pour intervenir en toute sécurité lors de l'opération chirurgicale.(voir p247 lignes 1-3)
- **fracture**, pour connaître la zone de rupture ou le déplacement des parties du corps concernées (épaules !) afin de faciliter le geste de remise en place (voir p247 lignes 6-8) ou de connaître le type de fracture et de préparer l'attelle avant d'ouvrir chirurgicalement la zone concernée:
 - * on repositionne à l'écran les organes déplacés
 - * on dessine l'attelle à l'écran
 - * on usine cette attelle
 - * on ouvre la zone et l'on pose l'attelle préparée
- *la présence de tumeurs* et leur rapport anatomique sont importants pour les diagnostics. (10-21). L'empreinte optique doit permettre de faciliter les diagnostics en utilisant des colorations sélectives. On peut en déduire entre autre:
 - le caractère (invasif ...)
 - les rapports de la tumeur avec son environnement ce qui en chirurgie permettrait de connaître les voies d'accès idéales et éviter les accidents opératoires.(voir dessin 71 page 248)
- J'image la mémorisation des organes du patient, sorte de carte vitale, utilisable partout dans le monde en cas d'accident. L'idéal serait d'avoir une **carte du patient** (ligne 32)

- **visualisation anatomique** (voir p 249)

Plus spécifiquement pour la dentisterie, l'empreinte secondaire permet:(voit pages 249 et 250)

- **en implantologie** : copie de l'alvéole ou de la surface osseuse pour fabriquer un implant sur le moule obtenu et de faire la prothèse complémentaire. (voir p249 ligne 5)
- **en prothèse conjointe** : la vue de la préparation , de son environnement (empreinte optique primaire) et de la surface osseuse sans utilisation du fil rétracteur ...permet un design exact de la future couronne. (voir lignes 14-20 p 249 et dessin 72a)
- **en prothèse adjointe** : les empreintes répétées et enregistrées successivement en faisant bouger les muscles permet d'affiner le contour modélisé théoriquement. La douceur de l'onde à la différence de nos pâtes d'empreinte , évite l'effet compressif (voir p 249 lignes 22-27 et dessin 72b)
- travail du métal (zone de contrainte) Ce passage me paraît intéressant sur le plan historique. En effet ce que **Altschuler** décrivait 2 années plus tard comme nouveau est présenté ici comme une application de l'interférométrie. Cette application sera la base de tout son article de 1973. Je prouve donc ici que ceci m'était parfaitement connu sous le nom de photo élasticimétrie (voir p250 lignes 7-13 et dessin 72c). Comme lui je décris les conséquences de cette application.
- contrôle de l'usure d'une couronne dans le temps par comparaison holographique. Cette application sur dents naturelles est très utile en parodontologie pour **les meulages sélectifs**. (voir p250 lignes 18-22)

Dans la pré -conclusion de la page 250 je rappelle que l'empreinte optique, comme le montre ce chapitre 9, ne s'arrête pas à la simple fonction d'empreinte.

Ceci m'amène à approfondir la méthodologie pour prouver cet état de fait.

- **l'empreinte du tenon** est (mal) décrite (voir p251 lignes 1 à 12 et dessins 72e à 72i))
 - l'empreinte de la tête du tenon émergente permet de connaître le canal si on connaît les dimensions du tenon mis en place.
 - l'empreinte du canal est à mon avis réalisable. Cela permettrait de connaître la forme des canaux et le positionnement des apex. Cela permettrait aussi de dimensionner et d'usiner des tenons individuels ou des cônes d'argent (voir p 253), de mettre en évidence des fractures de racine sans l'utilisation des RX et de fabriquer des instruments extracteurs d'instruments cassés.
 - ce passage décrit avec plus de précision page 253 dans le sous chapitre "rupture instrumentale"
- **l'inlay céramique** : je prévois l'application du **CEREC**. L'application de l'empreinte optique, à mes yeux, verra la disparition des composites et amalgames. (voir p 251 lignes 14-18). Ce sera l'argument de référence **de Siemens/Sirona** 10 ans plus tard, no comment !
- **coiffage pulpaire** sur mesure dans les 3e degrés.
- **tous les matériaux** étant usinables, il sera possible d'utiliser l'araldite de positionnement (voir p253 lignes 1-15) mais aussi d'autres matériaux inconnus car ils sont tous usinables à la différence des matériaux utilisables par la technique de la cire perdue. (voir p 253,lignes 13-16)

Après avoir énoncé les applications possibles dans l'étape de la prise d'empreinte optique, j'en arrive à décrire la deuxième étape correspondant à l'analyse de l'image comme nous le faisons aujourd'hui (2009) sur nos écrans d'ordinateur.

L'analyse des données numériques nous conduit à: (voir p253 lignes 29-33):

- **usiner directement l'intérieur de la couronne** , empreinte négative, sans utiliser l'ordinateur.
- faire l'empreinte d'une **dent non dégradée** avant de faire la préparation pour avoir la forme extérieure sans utiliser l'ordinateur et les dents théoriques (voir page 254)
- utiliser l'ordinateur si nous souhaitons intégrer:
 - a) **l'espace ciment** (voir p 254 lignes 3-10)
 - b) les **facteurs d'usure** en fonction du type de matériau utilisé (voir pour les céramiques)

il nous conduit aussi au stockage et à la visualisation des informations (voir p254 lignes 11-19) puis aux fonctions que devra avoir l'ordinateur (aujourd'hui programmes de CFAO dentaire)

La dent " typique " est ce que l'on appelle aujourd'hui une "dent théorique ou de référence en mémoire"

Page 255 est décrit le fonctionnement de l'ordinateur pour réaliser une couronne, un bridge ou un appareil de prothèse adjointe métallique avec intégration des théories (type "Dubecq, Cummer ...) (voir page 255).

En particulier on notera au milieu de la page 255 qu'est abordée la notion de **dialogue homme machine**. Il est prédit que cette communication sera "très simple à utiliser". C'est ce que nous avons été les premiers à concevoir dans le système Hennson Duret-système et que nous connaissons aujourd'hui avec les logiciels de CFAO dentaire.

Je reviens alors sur les centres de recherche responsables de l'évolution des logiciels dentaires pour faire bénéficier les utilisateurs et le corps médical en général des dernières "données de la science" (voir p 256). A l'époque je pensais que les centres universitaires sentiraient l'intérêt de ce type de travail. J'ai malheureusement déchanté au regard de la réaction de mes paires.

leur rôle serait particulièrement important pour "up grader" les logiciels.

La présente, ou deuxième étape, est la manipulation du logiciel de CAO. Elle portera sur:

J'appelle sculpture, la modélisation, terme que je ne connaissais pas à l'époque.

1) la modélisation de l'empreinte (comme le **Lava COS** en 2009) et son usinage.

2) la modélisation de l'intérieur de la prothèse (couronne et bridge) en tenant compte :

- du rôle de **l'occlusion** (voir ligne 19)
- des théories à l'ordre du jour
- des **granulométries des ciments** de scellement (voir p256 lignes 24-2)
- des calculs **des axes d'insertion** pour les bridges (p256 lignes 26-28 dessin 73a)
- de la correction des **contre-dépouilles** (voir p257 et 258 lignes 1-8, dessin 73b-d) avec acceptation ou refus de l'empreinte (le dialogue homme machine est encore décrit ici)

3) la modélisation de l'extérieur de la prothèse (couronne et bridge) en sachant que:

- la modélisation utilise des programmes qui tiendront compte des progrès de la science.
- il y a aussi , grâce à la mémoire des ordinateurs,le stockage des dents théoriques.

Ces deux étapes , modélisation intérieure et extérieure, sont schématisées dans le dessin 73e (p261)

Vient ensuite la dernière étape dite d'Usinage

Après avoir fait le design de la prothèse et du modèle, les informations sont envoyées à une machine outil à commande numérique.(voir p 259)

1) le premier usinage proposé est celui du modèle: (voir dessins 74a-d)

Il se rapporte **au modèle dentaire mais aussi aux images médicales** (os, tumeurs , veines ...).

Il se fera sur tous types de matériaux (résine métal ou plâtre). Chaque méthode est proposée avec l'indication du réglage de la machine , ses avantages et ses inconvénients dans l'application de "l'empreinte optique". Il ne s'agit pas seulement de rappeler les principes des méthodes (voir chapitre 8) mais de les adapter à notre application spécifique.

Pour cela je propose:

- l'électro érosion, en rappelant, comme nous le faisons avec **le Procéra**, l'obligation de changer les électrodes (voir en bas de la page 259)
- l'électro chimie, utilisée pour l'usinage **des implants** et dans les systèmes **type Wolf céram ...**
- l'ultra son en utilisant une lame très fine.
- le fraisage, évidemment, proposé en 3D avec ouverture sur les 4e axes en cas de contre dépouille.

L'usinage par fraisage est , selon cette thèse, fonction de la prise de vue (p262 lignes 1-7)

* si nous sommes dans l'axe de la prise de vue, l'usinage peut être axial (principe **du CEREC**).

* si nous ne sommes pas dans l'axe de la prise de vue, nous devons être multi axial.(tous les **systèmes actuels**)

Nous disposerons d'un modèle dans tous types de matériaux et reproductible à l'infini. (voir p 262 lignes 14-15)

La machine outil peut avoir un plateau porte outils (voir p 262), travailler en 3 , 4 voir 5 axes (changement d'angle) ou avoir plusieurs supports pour différents matériaux (changement de matière).

Il est aussi proposé (voir p 264 lignes 4-7) d'usiner des moules pour couler de l'or, usiner des mandrins de dépôt comme dans le **système de Krupp** ou le **système Weiland** que l'on détruira pour récupérer la pièce finie (araldite lignes 11-14) et respecter le réglage des facteurs d'usinage comme ... la rotation de la broche en fonction des matériaux.

Il est à noter que l'utilisation de fraises à contre dépouille est proposée avec un diamètre supérieur (voir lignes 16-19)

Conclusion :

- a) Tout est usinable, y compris les forages pour les tenons.
- b) le résultat est fonction de la vitesse de pénétration (voir p264 lignes 25-32) (1 heure à 2 heures pour quelques microns, ce qui est le cas aujourd'hui en 2009)

J'aborde enfin certains problèmes particuliers applicables à l'usinage de la prothèse dentaire:

a) Je conseille, pour toutes les méthodes d'usinage, d'utiliser une préforme proche de la dent théorique afin d'éviter les trop grosses pertes de matériau pouvant être très coûteuses avec l'or. (voir p 265 lignes 5-9)

b) Le dépôt par électro formage (utilisé sous la forme de fusion en 2009 ... voir **Bego**) me paraît être une solution intéressante pour réduire ces pertes onéreuses (voir lignes 19-20). Si on utilise cette technique, on obtiendra un dépôt constant dont il suffira d'usiner l'excédent. Cette idée a été reprise par Von der Zel dans son **système Cicero** dans les années 1990.

Cette méthode a aussi l'avantage, de part ce dépôt régulier sur la préparation, de permettre de construire une **couronne homothétique à la préparation**. Cette technique sera reprise dans les années 2000.

c) j'entrevois aussi la disparition des céramisations de surface et l'apparition de matériaux se rapprochant de la couleur de la dent. (un **métal comme la Zircon**). Ceci m'amène à proposer la couronne "Sandwich" (voir p 265 lignes 21-25) à la double propriété "extérieurement en métal inaltérable et intérieurement biologiquement idéal" (voir dessin 75c p267). On usinerait une couronne légèrement plus petite extérieurement puis on ferait un dépôt d'électroformage sur la partie externe.

d) Ceci m'amène à proposer la **soudure par laser** des prothèses du fait de la précision et les qualités intrinsèques de ce procédé (voir dessin 75c p 267). On peut aussi faire le façonnage de la prothèse en associant électroformage , **bombardement électronique** et autre découpe laser (voir couronnes à vis et inamovo-amovibles p 266)

e) Dans la méthode de l'empreinte optique, l'appareil de prothèse adjointe squelettique a son tracé de la plaque fait par l'ordinateur et le découpage du masque par laser. Sa réalisation utiliserait les techniques de fraisage (voir p 263) ou d'électro formage (voir p 266 lignes 23-25). Le laser permettrait de **souder les attachements**. (voir dessin 76b)

f) enfin p269 je propose la fabrication des **tenons** (pivots) par électroformage.

Dans la conclusion de ce Chapitre 9 sur l'application pratique de l'empreinte optique ...

Je conclus, dans le chapitre 9, que: (voir p 268-269):

a) l'association des différentes techniques d'usinage nous permet d'obtenir une précision acceptable se situant entre 5 et 10 μm et que ces actions conjuguées peuvent être faites sans limite d'investigation.

b) ces différentes techniques peuvent être portées sur un même support d'outils (fraiseuse, outil électrochimie ainsi que les outils de soudure par laser, par ultra son ou par bombardement électronique pour respecter les matériaux).

c) enfin je propose des temps de travail allant de 1 à 5 heures.

Il en découle que:

- a) n'importe quel type de matériau peut être travaillé avec une précision de quelques microns.
- b) l'absence de changement d'état des matériaux fait que nous ne modifions pas leur structure ce qui donne des garanties sur le "suivi de leur qualité".
- c) enfin j'explique qu'à aucun moment cette méthode ne subit les variations primaires, secondaires et tertiaires, ce qui était l'objectif de ce travail (voir le chapitre 1)

Chapitre final: Conclusion Générale

L'holographie, c'est à dire la seule réelle représentation 3D connue d'un jeune dentiste de 22 ans, devait à mes yeux être étayée par une présentation la plus solide possible, ceci explique l'importance des premiers chapitres.

a) Si la reproduction de l'empreinte peut être intéressante sur le plan conceptuel, elle ne justifie pas à elle seule un tel développement et un tel amortissement matériel. C'est pour cette raison que j'insiste sur toutes les applications couvertes par cette théorie (voir : lignes 1 à 12 p270).

- les prothèses adjointes (**squelettiques ...**) et les prothèses conjointes (**couronnes, bridges, coiffes**) sous toutes leurs formes

J'insiste tout particulièrement sur l'inlay usiné qui sera repris par le **CEREC** 15 ans plus tard.

- les **tenons et attelles médicales**.

b) Je justifie l'investissement par la possibilité offerte de réaliser toutes les prothèses (J'ai conscience de la situation matérielle d'un centre de soins, ce qui m'amène à rechercher la notion de rentabilité)

c) Puis je décris le système tel que je l'imagine et tel qu'il est aujourd'hui (en 2009).

- **caméra + laser, stockage** sur plaque et convertisseur analogique digital (tube analyseur, les CCD n'existant pas encore)
- **centrale de calcul localisée dans un centre où les logiciels** seront écrits et où ils évolueront (nos centres de conception de logiciels actuels de CAO)
- **Machines outils à commande numérique** localisées dans des centres comme nous le connaissons soit dans des laboratoires de prothèse, soit dans des centres industriels dédiés.
- le tout étant en interrelation par des **liaisons inter-commutées**, ce que l'on appellera plus tard "internet".

d) après avoir décrit la réalisation d'une prothèse en 1 ou 2 h après la taille, je résume le rôle de chacun des chapitres (1 à 9). **La précision finale devrait se situer entre 5 et 50 µm.**

e) je justifie ce travail car la réalisation actuelle est "empreinte" d'un certain nombre d'erreurs incontournables d'ordres psychologique pour le patient (pâte d'empreinte) et technique dans les laboratoires (fragilité de l'empreinte, états des matériaux, fatigue du prothésiste ...)(voir p 271)

d) je rappelle qu'il existe aussi des applications **purement médicales** comportant entre autre la réalisation des attelles et la facilitation des diagnostics (empreintes optiques secondaires).

e) je termine en rappelant un passage de l'encyclopédie scientifique qui m'a considérablement encouragé dans mon travail, dans un grand moment de doute fin 1972, et qui m'a fait penser que je devais être sur la bonne voie. Le temps m'a prouvé que j'avais raison.